

生体内低残存性高温断熱ウールの開発

High Temperature Low Bio-persistent Wool Development

小松 憲 司*
Kenji KOMATSU

抄 録

耐火断熱材である高温断熱ウールは、地球温暖化防止に寄与する省エネルギー材料の一つとして鉄鋼分野における適用が進められてきた。そして現在は安全性に配慮した生体内低残存性を付与した高温断熱ウールが開発されている。高温断熱ウールを利用した鉄鋼用断熱技術開発概況について述べるとともに、生体内低残存性繊維の紹介とその中の高温用繊維である“Superwool® XTRA (スーパーウールエクストラ)”の鉄鋼分野での用途展開の可能性について紹介した。

Abstract

High temperature insulation wool, which is a fire-protection with heat insulating material, has been applied in the field of steel process as one of energy-saving materials that contribute to the prevention of global warming. At present, high temperature insulation wool with low bio-persistent fiber with consideration for safety has been developed. This paper outlines the development of heat insulation technology for steel process, introduces low bio-persistent fibers, and expands the application of Superwool® XTRA, in the steel process.

1. 概 要

新日本サーマルセラミックス(株)の高温断熱ウール事業は、1984年に堺工場(当時 新日鐵化学(株)堺製造所)で人造鉍物繊維(Man-Made Vitreous Fibers, 以下 MMVF と略す)の一つであり非晶質繊維であるリフラクトリーセラミックファイバー(Refractory Ceramic Fiber, 以下 RCF と略す)(製品名 SC1260 および SC1400)の生産を開始した時から始まる。その後1986年には結晶質繊維であるアルミナファイバー(Poly Crystalline Wool, 以下 PCW と略す)(製品名 SC1600)を用いたモジュール品(製品名 Z-BLOK)が君津製鉄所厚板工場において採用され、以降高温断熱ウールを用いた鉄鋼プロセス製品用途展開が今日まで継続されている。

その後高温断熱ウールの一つである RCF の健康安全性が欧米にて議論されるに至り、RCF の代替となしうる非晶質セラミックファイバーに生体内低残存性(生体溶解性ともいう)を付加したアルカリアースシリケートウール(Alkaline Earth Silicate Wool, 以下 AES と略す)(製品名 Superwool® Plus および HT)の販売を随時開始した。

また直近では、2015年から開始された RCF の国内規制に対応すべく RCF からの代替ができなかった高温対応可能な生体内低残存性繊維の開発を行い、2019年から Superwool® XTRA (旧名 Superwool® XT) の上市を開始するに至った。これは RCF の高温グレードであった 1400 グレード RCF と耐熱性が同等の生体内低残存性繊維であり、これにより RCF の全てのグレードに代替対応できる生体内低残存性繊維の開発が完成した。

本報では、高温断熱ウールの紹介に始まり、高温断熱ウールの健康安全性、鉄鋼用断熱技術開発の概況について述べるとともに、生体内低残存性繊維として直近開発された Superwool® XTRA の紹介、そしてその鉄鋼分野での用途展開の可能性について紹介する。

2. 高温断熱ウールの特徴と種類

2.1 高温断熱ウールの特徴

MMVF は、鉍物、鉍石、鉍さい(スラグ)、岩石、無機酸化物粉末等を種々組み合わせて配合し、溶融化して、繊維化状にしたものであり、耐火材や断熱材として広く使用されている。その MMVF の中で RCF, AES, および

* 新日本サーマルセラミックス(株) 製造・技術部長 大阪府堺市堺区築港八幡町 102-1 〒590-0901

PCW を本報では高温断熱ウールとして定義する。高温断熱ウールの特徴は、他の MMVF よりも、より高温域での使用が可能であり、高温域での操業を求められる鉄鋼プロセスの中で広く適用されている。また耐火物全体の中では熱伝導率が非常に低く省エネルギー効果が高く、かつ低密度で低熱慣性であるため、炉体温度変更時の温度調整が容易であることがあげられ、本特性を利用し各所加熱炉、熱処理炉でファイバーライニング用として適用されている。

2.2 RCF の特徴

RCF は最高使用温度 1400℃ 以下で使用されるアルミナ-シリカ系の非晶質ファイバーである。本報では SC1260 および SC1400 を指標として RCF 繊維の基本特性を述べるが JISR3311 等の規格により各社ほぼ同質のものが販売されている。表 1 に RCF の化学成分を示す。品種によりその最高使用温度が定義されており、SC1260 は最高使用温度 1260℃ で化学組成は (Al₂O₃-SiO₂) 配合であるが、ジルコニアを添加した (Al₂O₃-SiO₂-ZrO₂) 系により耐熱温度を上げることができ最高使用温度で 1400℃ に分類される SC1400 も開発された。

RCF はその高温特性から一般的にアスベストの代替品として特に工業炉耐火材に幅広く使用されるに至った。課題は 1000℃ を超える温度域では結晶化の進行に伴って徐々に加熱収縮が生じ、温度上昇とともに収縮率が大きくなることや、スケールに代表される一部の炉内成分と反応して低融点物を生じやすいことがあげられる。よって長期間使用する場合、最高使用温度より低い温度域で使用する事が推奨されている。

2.3 AES 繊維の特徴

AES 繊維は JIS のような規格化された仕様がなく、各社から様々な AES 繊維が開発されている。本報では Superwool® Plus および Superwool® HT を指標として AES 繊維の基本特性を述べる。表 2 に AES の化学成分を示す。分類温度(当該温度で 24 時間加熱したときの収縮率が 4% 未満であるこ

と) 毎に製品名を決めており、標準タイプの Superwool® Plus は分類温度 1200℃、また高温タイプの Superwool® HT は分類温度 1300℃ と定義している。Superwool® Plus および Superwool® HT は SiO₂ を主成分に、アルカリ土類金属として CaO および MgO を、健康安全性を考慮してそれらの合計値が 18% を超えて添加した (SiO₂-CaO-MgO) 系として構成されている。表 3 には AES の物性を紹介する。

Superwool® Plus はそのショット率の少なさから熱伝導率が RCF 製品よりもさらに低い商品である。鉄鋼向けの適用範囲はその分類温度の低さから限られてはくるが低温域では最も省エネルギーに適用した製品である。鉄鋼プロセス以外の適用事例の一つとして船舶用の耐火被覆材が代表的な例である。高い耐火性と低い熱伝導率を生かして、より軽量での耐火性能を維持することで船舶の軽量化を実現でき、省エネルギー船または船舶の高速化に寄与している。

また Superwool® HT は RCF1260 と同等の収縮率として分類される製品で、鉄鋼用途では RCF1260 からの代替の主役となっている。

一方 AES には課題がある。その一つは RCF よりも低い結晶化温度であり、その結果 RCF に比べ AES は加熱後の繊維が硬く、同時に脆くなりやすく、耐久性に乏しい。その結果長期使用における表面減厚や剥離の懸念があり、現在加熱炉への適用は一部にとどまっている。それ以外には作業環境への懸念がある。表 4 に示すように現場取り扱い時にちくちくしたり肌がかぶれたりする、粉塵が多い、などの作業環境の悪化が明らかになった。AES は RCF に比べ繊維が太く皮膚への刺激性が強く、また繊維が折れやすいため粉塵が多いことが報告されているが²⁾、AES 繊維については生体内低残存性を付与させるため、化学成分は変更し難く、また繊維を細くすることは体内への繊維の吸入を促進する懸念があり、直接的な繊維改質による改善策は見いだせていない。現在は改質材の表面塗布などが提案されている³⁾。

表 1 RCF の化学成分
Chemical compositions of RCF

	Classification temperature (°C)	(wt%)		
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂
SC 1260	1260	46	54	-
SC 1400	1400	35	50	15

表 2 AES の化学成分
Chemical compositions of AES

	Classification temperature (°C)	(wt%)		
		Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO+MgO
Plus	1200	-	65	35
HT	1300	1	74	25

表 3 AES 繊維の特性
Characteristics of AES

	Thermal conductivity (8P-W/m-K)		Shot (%)	Fiber diameter (μm)
	600°C	1000°C		
Plus	0.12	0.25	35	4.0
HT	0.14	0.34	45	

表 4 現場取り扱い時の定性的評価
On site qualitative evaluation

Item	On site properties evaluation
Fiber diameter	PCW > AES > RCF
Itching	AES > PCW >> RCF
Dust	AES > RCF > PCW

3. 高温断熱ウールの健康安全性

3.1 RCF の健康安全性

RCF はアスベストの代替品として広く使用されていたが近年、人への影響が問題視されるようになり、環境に厳しい EU (Europe Union) で現在高懸念物質として登録されている。日本においては、2015 年 11 月から労働安全衛生法施行令の一部を改正する政令 (平成 27 年政令第 294 号) により MMVF 中の RCF が特定化学物質第 2 類に分類された。この改正により RCF はその当該製品を製造または取り扱う作業においては、局所排気装置の設置、作業環境測定、作業主任者の専任、特殊健康診断の実施義務などが課せられ、使用に制限が設けられることとなった (製造禁止ではない)。特に RCF を窯、炉等に張り付ける作業や、その補修、解体、破碎等の作業には有効な呼吸用保護具の使用、作業場所からの飛散防止等を義務付けた⁴⁾。またその規制対象となる RCF の化学組成は Al_2O_3 が 30~60mass%、 SiO_2 が 40~60mass%、 $RnOm$ が 0~20mass% (R は Zr または Cr) である。

3.2 AES の健康安全性

AES の開発は RCF の健康安全性への懸念に始まる。欧米では、アスベストの健康障害を契機に MMVF においてもアスベスト同様に発がん性のリスクを懸念する向きがあり、それらの評価が開始された。世界保健機関 (WHO) の下部組織である IARC (国際がん研究機関) では、1987 年 6 月に発がん性評価が実施された。また EU においては、1997 年 12 月に MMVF に対する梱包表示などで注意喚起が行われることとなった。これらを契機として人体により安全な MMVF が注目されるようになり AES の開発が進められた。

3.2.1 IARC による発がん性分類

IARC ではアスベスト障害を契機に 1987 年 6 月 MMVF を対象としたワーキンググループによる発がん性評価が実施された。その後も MMVF の調査が進み、2001 年にはそれらの再評価が実施され現在の発がん性分類に至った。これら 2 回の評価結果として、RCF はグループ 2B (ヒトに対する発がん性の可能性あり, possibly carcinogenic) に分類された。なお PCW および AES は発がん性評価データそのものが少なく現在のところ発がん性分類が行われていない。

3.2.2 EU における CLP 規制

EU においては、1997 年 12 月に発令された EU 指令 97/69/EC “人造非晶質繊維の発がん分類と梱包表示” により、MMVF に対する梱包表示による注意喚起が定められた。当該指令は、2008 年に発令された CLP 規則 [(EC) No.

表 5 CLP 規則による発がん性分類 (カテゴリー 2 とカテゴリー 3)
Carcinogen evaluation by CLP regulation (Category 2 and Category 3)

Chemical composition	Category
$Na_2O+K_2O+CaO+MgO+BaO > 18\%$	3 (possible carcinogenic)
$Na_2O+K_2O+CaO+MgO+BaO \leq 18\%$	2 (probably carcinogenic)

1272/2008 Classification, Labeling and Packing of Substance and Mixture) に引き継がれている。なお欧州 CLP 規則による発がん性分類では、MMVF はその組成により表 5 に示す 2 つに分類されることになり、RCF は “カテゴリー 2 (おそらく発がん性)” に、グラスウールやロックウールは “カテゴリー 3 (発がん性の可能性がある)” に分類された。なお AES については先に記述のとおり化学成分における規格化された仕様がなく、カテゴリー 2 または 3 のどちらに分類されるかは製品毎に確認を要する。

3.3 生体内低残存性繊維

先に述べた CLP 規則では繊維組成による発がん性の分類がなされているが、そのうちアルカリ金属またはアルカリ土類金属酸化物を 18% を超えて含有する繊維はカテゴリー 3 に属する。このカテゴリー 3 に属する繊維は “発がん性の可能性がある” と分類されているが、CLP 規則にはカテゴリー 3 に属する繊維に対する発がん性の適用除外要件 “Note R”, “Note Q” がある。“Note Q” では以下の四つの要件があり、それらいずれか一つを満足すると “適用除外 (Exonerated)” と位置付けられる。

①短期吸入による生体内滞留性試験

繊維長 $>20\mu m$, 繊維半減期 <10 日

②気管内注入による短期生体内滞留試験

繊維長 $>20\mu m$, 繊維半減期 <40 日

③腹腔内投与試験

有意な発がん性の証拠がないこと

④長期間吸入試験

発がん性に関連ある病原所見や腫瘍形成がないこと

新日本サーマルセラミックスの AES 繊維は化学組成からカテゴリー 3 に属し、かつこの適用除外要件の一つを満たしていることから生体内低残存性繊維であると定義できる。この対象は AES のみならずロックウールやグラスウールにも存在することを記述しておく。また AES 繊維が生体内低残存性繊維と同義ではないことから AES 繊維の使用の際はその確認を推奨する。

(JHIWA 参加企業が販売する AES はすべて生体内低残存性繊維であることが証明されていることを述べておく。)

4. ファイバー製品および鉄鋼用適用技術の開発

4.1 ファイバー製品

上述の高温断熱ウールの製法としては RCF, AES など

の非晶質ファイバーは溶融繊維化法で、結晶質ファイバーのPCWは前駆体繊維化法でバルクファイバーが生産されている。バルクファイバーはルブリカントを噴霧し積層の後ニードリング処理を施した後加熱し、ルブリカントを焼却することでブランケットが生産される。さらにこれらバルクまたはブランケットを元原料とし、二次加工することで各種最終製品が作られている。鉄鋼プロセスにおいてライニング材として広く採用されているZ-BLOKは、ブランケットをアコーディオン状に折り畳み、支持金具と一体化したモジュール品である。またバルクを湿式プロセスにて製紙加工し、金型成形することでペーパー、ボード、成形品が生産される。一方乾式プロセスではバルクを混紡、撚糸、織加工することでテープ、ロープ、クロス等の紡織品が生産されている(図1参照)。

4.2 主たる鉄鋼用途

鉄鋼用断熱材としての高温用断熱ウールはその他耐火材との比較において低密度な繊維構造体なので強度が低く、比表面積が大きく外来成分との反応性が高いため、溶湯、鋼材と直接接する用途には不向きであり、保温カバー、加熱炉、熱処理炉用モジュールが主な用途である。その他としては、タンディッシュ周りのシール材用ブランケット・ペーパー、各種耐火物のバックアップ材、真空成形品(VFS)、コークス炉のパッキ用紡織品などにも使用されている。

4.3 ファイバーライニング

鉄鋼分野での適用は、短時間使用と長期使用用途に大別される。長期使用用途においては高温断熱ウールを使用したライニング技術の開発が、鉄鋼プロセスの生産性向上、省エネルギーの推進等を目的とし、従来耐火物を使用していた構造、部位を高温断熱ウールおよびその加工品に代替する技術開発として行われた。開発に当たってはPCWが主として用いられた。PCWは1500℃程度までは高温収縮が小さく結晶変態による脆化がないため復元性が高温域まで維持される特徴があり、高温下での使用に適している。



図1 各種ファイバー製品
Various fiber products

4.4 ライニング用製品

4.4.1 モジュール品 (Z-BLOK)

PCWを使用したモジュール品は高温域での収縮がRCFより小さく、圧縮復元性が高温まで維持されるため加熱炉のライニングに最適である。また加熱炉形状によっては、直方体状の標準型のみでは対応できないため、コーナー型、リントル型、2連型等の多様な異型モジュールが適材適所に採用されている(図2参照)。

4.4.2 非水冷仕切壁

Z-BLOKは多様な異型モジュールが作製可能であるがその一つに非水冷仕切壁があり各加熱炉に採用されている。この製品の適用には困難があり過去には短時間で破断し脱落する現象が生じた。この背景には、仕切壁の単なる長尺化の問題以外に、省エネルギー、環境対策で積極的な採用が進んだ蓄熱式燃焼システム(リジェネバーナー)導入による操業条件および炉内環境変化の影響があげられる。高温、高速で火炎パターンが長くなったフレームが直接壁に接するとともに、高速の火炎で煽られた苛酷なスケールアタックによる繊維のダメージが顕著になった。それ以降、基材PCWブランケットの仕様を高温でも高引張強度品に変更し、直接火炎が触れる繊維表面には高温においても耐スケール性、耐熱収縮性を有するコーティング材を塗布することで脱落に至るリスクは軽減されている(図2参照)。

4.4.3 スキッドサポート

スキッドサポート用断熱材には、冷却水損失低減の観点から従来から低熱伝導性である繊維質断熱材の適用が試みられてきたが、その耐久性が課題であった。その解決に硬質に仕上りブランケット同様低熱伝導率である真空成形品(VFS)を基材として採用し、また嵌合構造を工夫することにより、半円状の2分割品をドーナツ状にスキッドサポートを包む工法とし従来同等の施工性を維持した。基材を硬

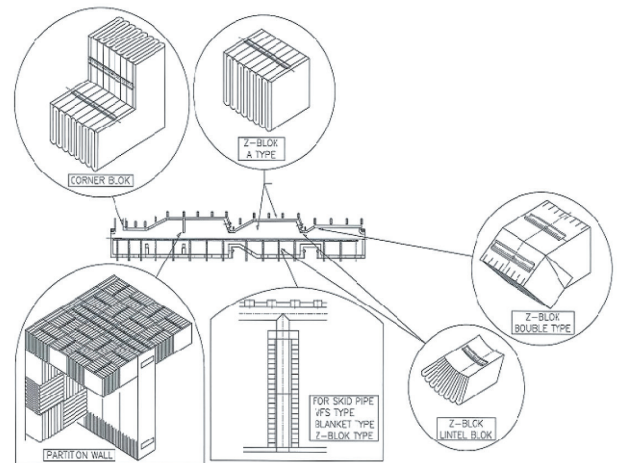


図2 各種Z-BLOK形状
Various Z-BLOK design

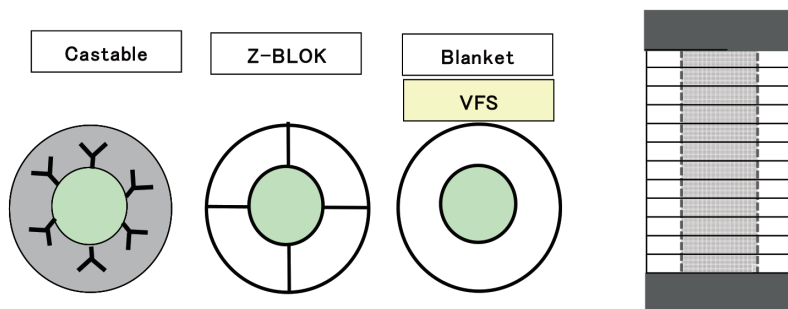


図3 代表的なスキッドサポート断熱材の断面模式図, および VFS 型断熱材の施工模式図
Cross-section schematic diagram of typical skid support and insulation schematic diagram

質な繊維構造としたことで、上述の耐スケール性、耐熱収縮性コーティング材の硬化固着性も高まり、スケールアタックに対する相乗効果をあげている⁵⁾(図2, 図3参照)。

5. Superwool® XTRA

5.1 高温用生体溶解性繊維の開発

RCF規制以降、生体内低残存性AESの需要は拡大したが、従来の製品バリエーションは分類温度1200℃および1300℃の2種類にとどまりRCFの1400℃グレードの代替品が開発できていない課題が残されていた。その結果高温用RCFはPCWへ代替されたが、コストアップの一因となっている。そこで高温下で使用可能で、PCWに比べて安価な製品として開発されたのが新製品Superwool®XTRAである。Superwool®XTRAの化学成分を表6に示す。Superwool®XTRAは(K₂O-Al₂O₃-SiO₂)系で構成されており、AESの(SiO₂-CaO-MgO)系とは異なる化学成分を有しているが、生体内低残存性繊維であることが証明されている。また化学成分が異なることからAESとは異なる特性が発見されている。

5.2 Superwool® XTRA の特性

5.2.1 高温特性評価法および結果

高温特性評価法の一つとしてブランケットにおける“加熱線収縮率”があげられる。Superwool®XTRAを含む非晶質繊維の収縮率を図4に示す。なお試験方法はブランケット製品を所定温度、所定時間加熱した後常温に冷却した時の加熱前/加熱後の寸法変化率を持って収縮率として定量評価するものである(JIS-R3311, ISO10635などに試験法が記載)。

非晶質ブランケットにはある一定温度になるとその収縮率が急激に悪化することから分類温度(最高使用温度)と呼ばれる使用温度範囲の目安が示されており、図4でその温度を読み取ることができる。所定温度で24時間連続加熱したときの収縮率が4%以下になることを前提として評価し、その結果を表7に示す。AESは1200℃、あるいは1300℃を境に収縮率が急激に悪化することが課題であるがSuperwool®XTRAは1400℃においても収縮率4%以下を達

表6 Superwool® XTRA の化学成分
Chemical composition of Superwool® XTRA

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂	K ₂ O	MgO
XTRA	36	30	7	26	1

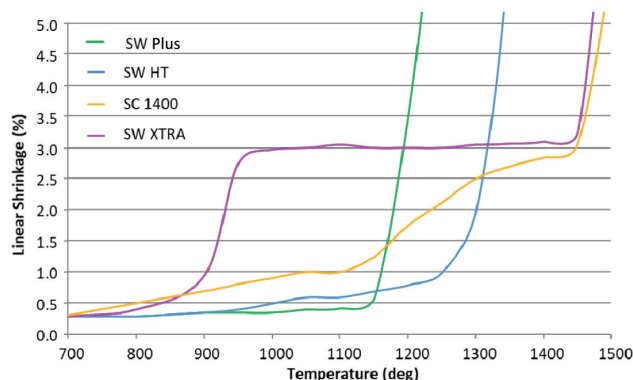


図4 各ファイバーの加熱線収縮率結果
Shrinkage test heated for 24 hours

表7 加熱線収縮率結果
Shrinkage number (%)

	1100℃	1200℃	1300℃	1400℃
XTRA	3	3.1	3.1	3.5
HT	0.6	0.8	2.3	> 4
Plus	0.3	3.1	> 4	—
SC1400	1	1.7	2.5	2.8

成でき、1400℃用RCFと同等の耐熱性を有することが確認できた。

図4から分かるSuperwool®XTRAの他と異なる加熱線収縮率の特性は、低温下での加熱線収縮率の増加にある。これは当該温度でXTRAの一部が微細な結晶化をしていることに起因しており収縮が発生している。一方XTRAはその繊維の加熱時の膨張率が大きく例えばRCF1400の数倍の膨張率を有するので、加熱時にはその収縮した隙間が閉じられることが確認できた(図5参照)。つまりSuperwool®XTRAは加熱後の常温ではその加熱線収縮率の大きさから隙間がより大きく見えるが、再加熱時には大きく膨張してその隙間を閉じることで断熱性を保持している。Superwool®XTRAモジュール品の適用に当たっては事前にテスト評価

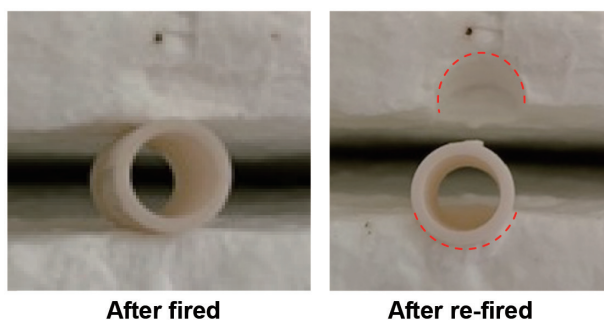


図5 再加熱前後での XTRA の隙間開閉確認結果
1260°C加熱後
Evidence of gap closure when re-fired to 1260°C

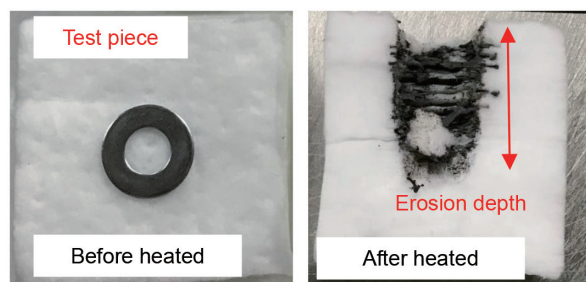


図6 耐 FeO 性テスト方法
Example of the FeO resistance test

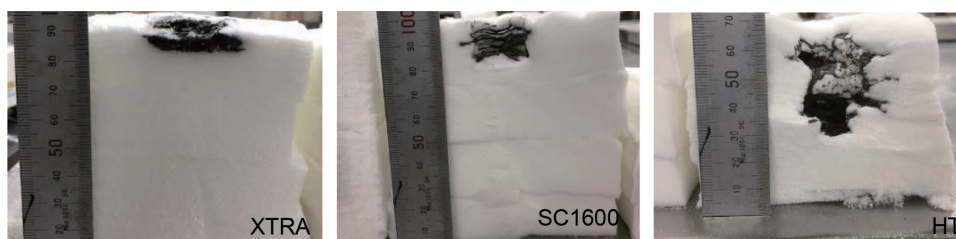


図7 耐 FeO 性テスト結果写真 1325°C 5分加熱後 (XTRA, SC1600, HT)
Picture of FeO resistance properties at 1325°C for 5 min with different fiber (XTRA, SC1600, HT)

を通じて適用判断することを推奨している。

5.2.2 耐スケール性

Superwool® XTRA の特性の一つに“耐スケール性”がある。耐スケール性の評価方法としては、図6に示すように128kg・m⁻³ブランケットに所定重量の鉄片(FeO)を置き、所定温度および時間熱処理した後の鉄辺の侵食深さを測定し、その侵食度を評価した。

Superwool® XTRA は FeO の浸食に対し耐久性を示し、AES だけでなく PCW よりも高い耐久性を示すことが確認できた(図7参照)。

5.2.3 耐アルカリ性評価法および結果

Superwool® XTRA は RCF との比較では耐アルカリ性を有しているのが特徴の一つであり、特に Na への耐久性は従来の RCF1400 グレードに勝るものがある。図8は Superwool® XTRA と 1400°C RCF の耐アルカリ耐久性比較試験として、3% Na⁺ 溶液に含浸後、1300°C で 24 時間加熱した状態の比較画像である。写真より明らかなように Superwool® XTRA は RCF1400°C に対し高い耐アルカリ性を有している。

5.3 鉄鋼プロセス用途への展開

現在、Superwool® XTRA はブランケットおよびペーパー(一部バルク、VFS)が販売されている。Superwool® XTRA ブランケットは連続铸造工程での適用が始まった。浸漬ノズルやロングノズルのラッピング材で先行適用が始まり、

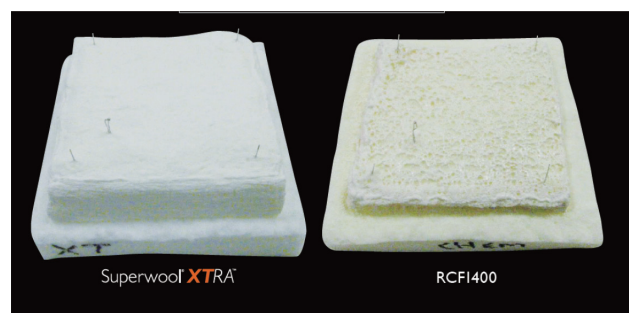


図8 耐アルカリ性テスト結果
(1300°C, 24時間, 3% Na⁺ 溶液浸漬)
Alkali resistance evaluation
(soaked 3% Na⁺ solution and heated 1300°C for 24 hours)

その高い耐用性が確認され採用に至った。その後铸造設備周りのシール材としても本格採用が始まったが Superwool® HT を上回る耐用性が確認されている。

一方ライニング用の Superwool® XTRA 適用は今後の課題である。生体内低残存性繊維共通の課題である長期使用時における加熱時の結晶化または粉化による繊維脆弱化が進行する懸念が Superwool® XTRA にも同様に考えられる。解決策として改質材の塗布やコーティング材の適用を含めた提案を各製鉄所向けに勧めていきたい。また Superwool® のスキッドサポートはその膨張率の大きさから繰り返し使用時の割れを誘発することから現在のところ開発の用途は未定である。

6. まとめ

地球温暖化防止、化石燃料の有効利用に寄与する省エネ

ルギー技術は鉄鋼分野においてもますます重要になっていく。新日本サーマルセラミックスの断熱技術開発の役割は重要性を増す一方、鉄鋼生産プロセスの向上には耐火物にとって過酷な条件を伴うことも考慮する必要がある。またMMVFには健康安全性への配慮も作業環境の側面から重要な課題である。生体内低残存性繊維 Superwool® シリーズの開発を通じて各温度対応の繊維の開発に一応の成果を果たしたが鉄鋼分野での利用技術の開発には課題もある。高温グレードとして開発された Superwool® XTRA を中心に継続して炉材技術関係者との連携に努め、より一層省エネルギー、環境に配慮した断熱材開発に繋げていく所存である。

参照文献

- 1) 独立行政法人環境再生保全機構：アスベスト(石綿)とは？
<https://www.erca.go.jp/asbestos/what/higai/mechanism.html>
(2019-7-3)
- 2) 上道健太郎, 堀場弘輝, 角村尚紀：耐火物. 68 (5), 192-197 (2016)
- 3) 前田剛志, 河野幸次：耐火物. 70 (4), 183-187 (2018)
- 4) 厚生労働省：平成 27 年 11 月の特定化学物質障害予防規則, 作業環境測定基準等の改正
<https://www.mhlw.go.jp/file/06-Seisakujouhou-11300000-Roudoukijunkyokuanzeniseibu/0000099126.pdf> (2019-06-13)
- 5) 新日化サーマルセラミックス：新日鉄技報. (388), 110-116 (2008)



小松憲司 Kenji KOMATSU
新日本サーマルセラミックス(株)
製造・技術部長
大阪府堺市堺区築港八幡町102-1 〒590-0901